

学部生のための重力モデル

ヨト・V・ヨトフ
(Yoto V. Yotov)

日本語訳：

板倉健 (Ken Itakura)

木股悠太郎 (Yutaro Kimata)

内田真輔 (Shinsuke Uchida)

2025年12月



DREXEL UNIVERSITY

Center for

Global Policy Analysis

LeBow College of Business

The CGPA working papers are circulated for discussion and comment purposes. They have not been peer-reviewed or been subject to the review by the CGPA Board. The CGPA does not hold any responsibility for the content and correctness of the papers in this series.

担当の先生へ

この章を授業で使っていただき、ありがとうございます！ この章の執筆には多くの時間と労力を注いできました、お役に立てば幸いです。この章の本文と、実習用データとコード、演習問題とその解答は、自由に使える無料の公共財です。ただし、以下の点にはご配慮ください：

- 学生には、このウェブサイト https://yotoyotov.com/Gravity_Undergrads.html から直接、本文と実習用データとコードをダウンロードするよう指示してください。ダウンロードの状況がわかると、この取り組みを今後も継続する価値があるかどうか判断するのに役立ちます。
- この章の本文や付属データやコードに関して、懸念される点、不整合、誤字脱字、誤りなどがありましたら、お知らせください。この章がより役立つような改善の提案は、yotov@drexel.edu まで、いつでも歓迎です。
- 章末の演習問題の解答を入手したい場合は、yotov@drexel.edu までメールしてください。
- 最後に、研究プロジェクトなどでこの章を利用する場合は、適切に引用するよう学生を促してください。

著者について



この章は、プロフェッショナルとして私が持っている二つの最大の情熱 - 教育への愛情と貿易の重力モデルへの献身 - からできています。そのため、この章は私にとって最も価値ある貢献の一つです。多くの学部生、修士課程の学生、そして貿易の重力モデルの入門から恩恵を受ける他のの方々にとって、有益なものとなることを願っています。

私が博士号取得を決意したのは、教育と重力モデルが理由でした。それ以来、私はキャリアを貿易の重力モデルに捧げてきました。これまでに、理論モデルと推定手法と計算方法の開発、そして重力モデルのデータベース構築など、数多くの貢献を行ってきました。私の重力モデルに関する研究は、権威ある学術誌に掲載されています。また、私は重力モデルを用いて多くの国際機関、政府、シンクタンクへの助言・コンサルティングを行ってきました。

おそらく本章の目的において最も重要なことは、私がこれまでに 130 カ国以上からの学生、研究者、政策立案者など何百人ものの方々を対象に、重力モデルを幾度となく講義してきたということです。また、学部生の重力モデルに関する研究を指導した経験から、このモデルが確かに理解しやすく学部生にも有用であると確信しています。本章は最先端の手法と実践的な政策ツールを学部教育の現場に届けるまたとない機会であり、この章の執筆を光榮に思っています。



板倉健 (いたくら・けん) 名古屋市立大学大学院経済学研究科教授。東北大学大学院経済学研究科 (政策デザイン研究センター) 客員教授、内閣府経済社会総合研究所 (ESRI) 客員主任研究官、経済産業研究所 (RIETI) ファカルティフェロー。国際貿易分析プロジェクト (GTAP) モデルやデータベース開発に携わり、貿易政策や環境分野の CGE 分析を行っている。愛知教育大学 (BA)、名古屋大学国際開発研究科 (MA)、Purdue 大学農業経済学研究科 (PhD)。世界銀行コンサルタント、Purdue 大学 Center for Global Trade Analysis や SEAS Lab での研究員を経て現職。



木股悠太郎 (きまた・ゆうたろう) 名古屋市立大学大学院経済学研究科博士後期課程。専門は国際貿易。現在は、自由貿易協定が財貿易、サービス貿易、そして海外直接投資にどの程度の影響を及ぼすのかを実証的に分析している。重力モデルは、こうした貿易政策の効果を定量的に把握するための中心的な枠組みになっている。本書は、重力モデルの理論と応用を体系的に学べるよう構成されており、学部生や大学院生が理解を深めるための最適な出発点である。



内田真輔 (うちだ・しんすけ) 名古屋市立大学大学院経済学研究科教授。東北大学大学院経済学研究科 (政策デザイン研究センター) 客員教授、およびアジア成長研究所客員教授。慶應義塾大学経済学部卒業後、University College London で MSc (環境資源経済学)、University of Maryland で PhD (農業資源経済学) 取得。信州大学を経て現職。専門は環境経済学と応用計量経済学。環境政策やエネルギー政策などの政策評価に係る実証分析を中心に研究を行っている。Journal of Health Economics 誌や American Journal of Agricultural Economics 誌等に論文を掲載。

謝辞および免責事項

本章の執筆にあたり、直接的・間接的に貢献してくれた多くの同僚や友人に心より感謝します。その方々は、デリナ・アグノステヴァ、ジェームズ・アンダーソン、スコット・ベイアー、リチャード・ボールドウィン、リチャード・バーネット、ジェフ・バーグストランド、コジモ・ベヴェレリ、インゴ・ボルヒェルト、セバスチャン・ブラッドリー、フェデリコ・カ ril = カッチャ、カーステン・エッケル、ピーター・エッガー、ガブリエル・フェルバーメイヤー、リサンドラ・フラッハ、ハビエル・フローレス、ライオネル・フォンテーヌ、レベッカ・フリーマン、ジーン・グロスマン、ジャン・グロスマン、ジェームズ・ハリガン、ベノ・ハイド、インガ・ハイラント、ジュリアン・ヒンツ、ピーター・ハーマン、ポール・コー、オヒョン・クォン、マリオ・ラーチ、マイア・リナスク、ジェフ・ラックステッド、マルティナ・マーリ、インマ・マルティネス=サルソソ、クセニア・マチュケ、ホセ・アントニオ・モンテイロ、アルネ・ナーゲンガスト、セルゲイ・ニガイ、ケビン・オルーク、ジョルディ・パニアグア、ブレイク・ピーターズ、ロベルタ・ピエルマルティーニ、レイ・リーツマン、フェルナンド・リオス=アビラ、アナ・マリア・サンタクレルー、マウリシオ・セプルベダ、セルジュ・シッカー、ジョアン・サントス・シルバ、ボブ・ステイガー、コスタス・シロポウロス、アンジェロス・テオドラコプロス、ファリド・トゥバル、ヨシュカ・ワナー、エルダル・ヤルシン、ヤン・ス・ユン、トム・ジルキン。本章のあらゆる側面において計り知れない支援を提供してくれたブレイズ・ジャンジュリオには特に感謝します。ドレクセル大学グローバル政策分析センターからのご支援と励ましにも感謝いたします。多くの学部生向け教科書と同様に、参考文献の数はあえて抑えています。重要な論文やサーベイには本文中で言及しています。この章のすべての記述と誤りについては、著者が責任を負います。

名古屋市立大学の板倉健教授、木股悠太郎氏、内田真輔教授が本章の日本語訳を快く引き受けてくれたことに深く感謝します。この翻訳が多くの学生の役に立つことを願っています。

学部生のための重力モデル

重力方程式は、国際貿易の「主力」モデルで、貿易政策の分析において最も広く利用されているツールです。例えば、大手メディアで広く取り上げられたニュースとして、2025年にドナルド・トランプ大統領が導入した関税、英国のEU離脱（BREXIT）、ウクライナ侵攻後ロシアに科された貿易制裁、その影響や効果についての数量的な分析には、貿易の重力モデルが使われています。そのため、フィナンシャル・タイムズ紙の一面で取り上げられた実証分析モデルが、重力モデルだけだとしても驚くことはないでしょう（図1参照）。

図1: フィナンシャル・タイムズ紙一面の重力モデル



出所: フィナンシャル・タイムズ (2016年4月19日) ピーター・ニアリーの2019年王立経済学会会長講演から。

貿易の重力モデルが、広く知られる存在となった主な理由は (i) 比類のない予測力があること、(ii) しっかりとした理論的基礎があること、(iii) 学部生を含む多様な読者にとって非常に直感的で理解しやすいこと、(iv) 多様な政策を研究するための実証的な実装が容易であることです。しかしながら、こうした理論的基礎、顕著な実証的成功、直感的な魅力、実装の容易さにもかかわらず、重力モデルは学部レベルの国際貿易の教科書で、適切かつ十分に取り上げられてきませんでした。このギャップを埋めるため、本章の主な目的を以下のように設定します：

- 貿易の重力モデルを学部生に紹介します。学生にとって、重力モデルが、なぜどのように役に立つのか説明します。そして、重力モデルが広く受け入れられ、成功を収めてきた理由も説明します。これが第1節の目的です。
- 単純な重力方程式の理論的根拠を示し、それを構造重力モデルに発展させます。そして、実証分析や推定で重要となる重力モデル理論の含意を明らかにします。これが第2節の目的です。
- 理論的な重力モデルを計量経済モデルに変換し、モデル推定に伴う計量経済学上の主要な課題を解説します。そして、重力モデル推定のため直感的で実践しやすい推奨事項をまとめます。これが第3節の目的です。

- 実践的な応用にむけて、現実の経済データと簡潔なコードを使い、分析実習を行います。計量経済学やセミナー授業での実証的なプロジェクト、あるいは学部卒業論文の執筆に役立つ演習問題、ガイダンス、追加データも提供します。この内容を第4節と章末に掲載された一連の演習問題で扱います。

1. 重力モデル：なぜ学ぶのか？ なぜそれほど人気なのか？

同僚の教授達からの問い合わせに回答したり、学部生が重力モデルに触れた際の感想を読んだり、また私自身の教育とコンサルティングの経験から、貿易の重力モデルは学部生に教えることができ、そして教えるべきであると、私は確信しています。Box 1は、学部の講義で重力モデルを扱うべき理由と、学部生にどのように役立つのかを列挙しています。

Box 1. 重力モデルをなぜ学ぶのか & 学部生にどのように役立つのか？

- 貿易の重力モデルは、学部レベルの国際貿易の教科書で標準的に扱われるモデルに比べて、二国間貿易フローの予測に成功しています。そして、学術研究と政策立案の現場で広く応用されています。
- 重力モデルは、古典的な貿易理論を補完し強化することができます。特に、実証的な重力モデルを用いることで、学生は古典的な貿易理論を検証することができます。
- 重力モデルには明確な実用性と多様な応用可能性があります。貿易コストを厳密かつ現実的に扱う実証モデルであり、現実の経済データを用いて容易に実装できるため、理論中心の学部生向け国際貿易の講義を充実させることができます。
- 重力モデルは直感的に理解しやすく、理論表現も簡潔であるため、学部生を含む幅広い層にとって理解しやすく扱いやすいモデルです。
- 近年の計量経済学とコンピュータの発展により、最先端の実証的重力モデルを、基礎的な計量経済学の知識（例えば、最小二乗法（OLS）や固定効果モデルの使用）で実装することが可能です。簡単に実装ができるように、本章では、データと推定のためのコード、実践的な分析、そして政策課題についての演習問題を提供します。
- 重力モデルは貿易以外の分野でも学生の役に立ちます。具体的には、本章で身に付けた直観と実証分析手法を、二国間の移民フロー、海外直接投資（FDI）、国境を越えた特許利用などの分析にそのまま応用できます。
- 重力モデルは、学部レベルでの国際貿易の授業に適しているだけでなく、計量経済学の授業や学部ゼミ、また学部卒業論文の執筆や研究プロジェクトに取り組もうとする学生にも役立ちます。

貿易の重力モデル 国際貿易の重力方程式は、国 j の国 i からの輸入額として定義される二国間の貿易フロー (X_{ij}) が、輸出国の経済規模 (Y_i) と輸入国の経済規模 (Y_j) の積に比例し、二国間の貿易コスト (T_{ij}) に反比例することを予測します：

$$X_{ij} = \tilde{G} \frac{Y_i Y_j}{T_{ij}^\theta}, \quad (1)$$

ここで \tilde{G} は貿易における重力定数であり、 θ は貿易コストに対する貿易フローの弾力性を表しています。この θ は、貿易コストが変化した場合に貿易フローがどの程度反応するかを捉えるパラメータです。直観的には、式 (1) は、二つの国の経済規模が大きければ大きいほど、また距離が近ければ近いほど、両国間の貿易が大きくなることを意味しています。このシンプルさと直観的な分かりやすさこそが、貿易の重力モデルが持つ最も魅力的な特徴の一つです。

重力モデルはなぜそれほど人気なのか？ 貿易の重力モデルは経済学者や政策担当者に広く受け入れられています。その主な理由は四つあります。第一に、ニュートンの万有引力との類推から、国際貿易の重力モデルは非常に直感的に理解しやすいからです。

1. 重力方程式は非常に直感的

貿易の重力方程式とニュートンの万有引力の法則がとてもよく似ていることを、Box 2 で示しています。両者を見ると、二つの国（物体）の間の貿易（引力）は、両国の大きさ（質量）の積に比例し、二国間の貿易コスト（距離の二乗）に反比例するという類似性を示しています。簡単に言うと、二つの国が大きくて近いほど互いの貿易は増加する、ということです。

Box 2. 物理における重力・貿易における重力

物理における重力

$$F_{ij} = G \frac{M_i M_j}{D_{ij}^2}$$

ここで：

F_{ij} は物体 i と物体 j の間の重力

G は物理における重力定数

M_i と M_j は物体 i と j の質量

D_{ij} は i, j 間の距離

2 は距離に対する重力の弾力性

貿易における重力

$$X_{ij} = \tilde{G} \frac{Y_i Y_j}{T_{ij}^\theta}$$

ここで：

X_{ij} は国 i と国 j の間の貿易額

\tilde{G} は貿易における重力定数

Y_i と Y_j は国 i と j の経済規模

T_{ij} は i, j 間の貿易コスト

$\theta > 0$ は貿易コストに対する貿易フローの弾力性

この貿易と物理学における重力方程式の対比と類似性をさらに際立たせるのは、貿易の重力方程式が確かなミクロ経済学の理論から導出できるということです。

重力方程式がこれほど人気である第二の理由は、実際に機能するという点にあります。実証的な重力モデルは二国間の貿易フローを驚くほど正確に予測します。

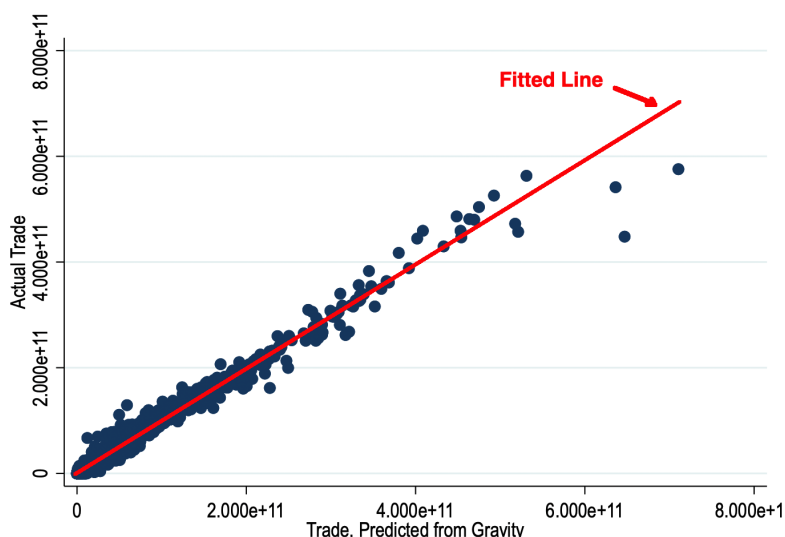
2. 重力方程式には驚くほどの予測力がある

重力方程式は、実際の貿易データと予測値との間に一貫して非常に高い精度のあてはまりを示します。また、二国間の距離、国境が接していること、共通の公用語、過去の植民地関係、地域貿易協定（RTA）など、標準的な重力変数として知られている独立変数についても、妥当な（大きさと符号の観点で）推定結果を得ることができます。例えば、二国間貿易フローは距離が増えると減少しますが、地域貿易協定が締結されると増加するといった結果です。

図2は、重力モデルの優れた予測性能を可視化しています。1990年から2023年までの期間について、世界の上位100の輸出国を対象にして、重力モデルによる二国間貿易フローの予測値と、実際に観察された貿易額を図示しています。図2の予測値は、本章の第4節で実装する最新の計量経済学的重力モデルの結果であり、このモデルの実証的な予測性能が前例のない水準にあることを示しています（例えば、実際の貿易と予測された貿易の相関係数は0.99です）。しかし、第4節の議論と章末の演習問題で示すように、わずか3つの独立変数からなる単純な重力モデルであっても、二国間貿易フローをかなり精度良く予測できます。

図2の予測は、1990年から2023年までの期間で変動するデータに基づいています。重要な点として、重力モデルは単年度のデータ（クロスセクション）でも、複数年を統合したデータ（パネルデータ）でも極めて良好に機能します。さらに、重力方程式は国レベルに集計した貿易データに限らず、あらゆる集計レベル（例：製品別、産業別、セクター別など）に分解したデータでも高い予測能力を発揮します。

図2：重力モデルの予測力



出所：筆者、第4節の分析から

重力方程式が広く受け入れられている第三の理由は、非常に柔軟なモデルだからです。

3. 重力方程式は非常に柔軟

貿易フローを説明しその決定要因の効果を定量化するために、何百もの学術論文で重力モデルが応用されてきました。また貿易政策の分析においても定番のモデルとなっています。Box 3は、貿易フローの決定要因として「伝統的」なもの「より特殊」なもの（とはいえ網羅的とは程遠い）を示しています。貿易フローの決定要因の効果や、貿易が及ぼす他の経済への影響を研究するには、重力モデルを何らかの形で応用することになるでしょう。

Box 3. 重力方程式の応用

「伝統的な」貿易の決定要因 距離、隣接性、GDP、人口、経済発展、特惠貿易協定、関税、関税戦争、輸出補助金、地理、非関税措置、世界貿易機関（WTO）加盟、関税同盟、欧州連合（EU）、共通通貨と通貨同盟、OECD加盟、IMF加盟、海外直接投資、移民、文化的結びつき、植民地関係、共通言語と共有言語... など。

「より特殊な」貿易の決定要因 制度の質、対外援助、信頼、人的評判、製品評判、為替レート、COVID-19、英国のEU離脱（Brexit）、輸出促進、特許、技術的貿易障壁（TBT）、衛生植物検疫基準（SPS）、法人所得税、付加価値税、メガスポーツイベント（オリンピックやワールドカップ）、禁輸措置や制裁（例：対ロシア）、紛争と戦争、海賊行為、氷冠融解、スエズ運河閉鎖、トランプ政権の関税戦争... など。

上記の多くの応用例について、具体的な参考文献は [Yotov \(2024\)](#) を参照してください。

重力モデルには、貿易に対する任意の決定要因を組み込むことができることに加えて、さらに四つの柔軟性を持っています。第一に、重力モデルはあらゆる集計レベル（製品、産業、部門など）で応用可能です。第二に、貿易理論に比べると理論的な基礎が発展途上ですが、海外直接投資（FDI）、移民、国際技術移転など、他の二国間フローの研究にも重力モデルが成功裏に応用されてきました。第三に、本章後半で示す通り、標準的な統計ソフトウェアを使って最新の実証的重力モデルを容易に実装できます。第四に、重力モデルは、物的資本投資、環境モデル、労働市場などより広範なモデルと柔軟に統合することが可能です。

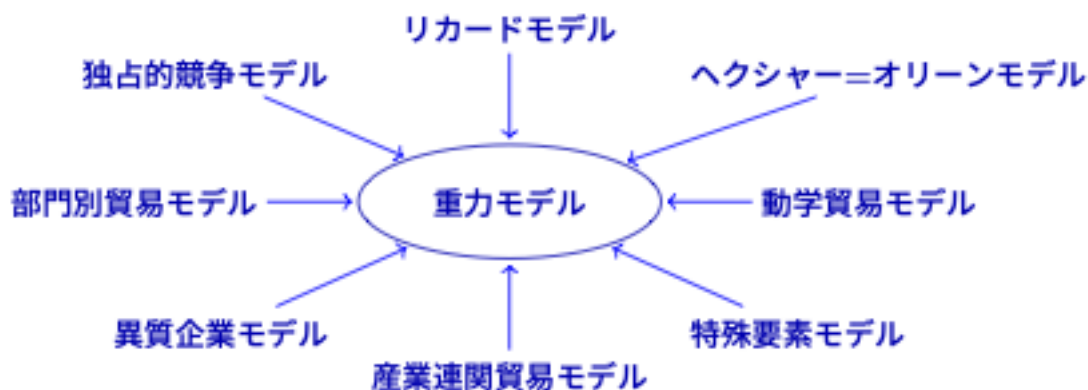
重力モデルが成功している第四の理由は、確固としたミクロ経済学理論から導出できる点です。

4. 重力方程式は確かな（多くの）理論的基礎を持つ

貿易の重力方程式で最も注目すべき特徴の一つは、比較的標準的な仮定のもとで、ミクロ経済学の多様な理論から導出可能という点です。図3が示すように、重力方程式は学部レベルの教科書で一般的に扱われる古典的な貿易理論 - リカードモデル、ヘクシャー=オリーンモデル、独占的競争モデル、

特殊要素モデルから導くことができます。さらに、部門別貿易モデル、動学貿易モデル、産業連関構造を持つ貿易モデル、企業異質性を持つ貿易モデルからも、同一の重力方程式が導出可能です。

図 3：貿易の重力モデルの理論的基礎



出所: 筆者、Yotov et al. (2016) から

国際貿易の研究者たちが、これほど多様な貿易理論がシンプルで直感的な同一の重力方程式に収束することに気付くまで、長い時間を要しました (Box 4 参照)。しかし振り返ってみれば、貿易を決定づける要因が、輸出側の影響力、輸入側の影響力、二国間の影響力という、直観的な三つの要素に要約できることも、驚くべきことではないかもしれません。この直観はあらゆる社会経済的な二国間関係にも当てはまります。したがって、第 3 節および第 4 節で取り上げる実証的手法と分析の実習は、より広範な分野 (例: 海外直接投資、移民、技術移転など) にも応用可能です。

重力モデルの理論的基礎は、実証分析において多くの重要な示唆を与えてくれます。例えば、理論をより忠実に反映することで、重力モデルの総合的な予測力の向上と、貿易政策の効果をより正確に推定することにつながります。これに関連して、重力モデルの主要な理論的特徴を検討することで、国際貿易の研究における重要なパズルが解決されてきました。例えば、距離が貿易に及ぼす効果が時間とともに減少しないという直感に反する発見や、重力モデルでは二国間貿易の不均衡を適切に説明できないとするパズルが挙げられます。重力モデルの理論は、モデルを推定する上で最も重要なポイントを導いてきました。例えば、多国間貿易コストを考慮に入れることなどです (詳細は次節)。最後に、重力モデルの理論は貿易効果を他の経済的帰結 (労働市場効果、環境影響、物的資本投資、経済成長など) に結びつけることを可能にします。

話を先に進める前に、他の多くの偉大な発明と同様に、貿易の重力モデルは一夜にして脚光を浴びるようになったわけではない、ということをお覚えておいてください。むしろ、Box 4 で要約しているように、重力モデルが国際貿易を専門とする経済学者の支持を得て、貿易分析の主力モデルとなるまでには長い年月を要したのです。

Box 4. 重力モデルの物語

2025年、重力モデルは国際貿易分野に君臨している！この名声への道は容易なものではありませんでした。経済学に重力を応用した最初の研究は、物理学からの類推で経済理論に基づくものでありませんでした。多くの研究者は、重力モデルを経済学に応用した最初の人物として Tinbergen (1962) を挙げます。貿易の観点からすると正しいかもしれませんが、なぜなら、彼は 1969 年のノーベル賞受賞者（議論の余地はあるが）であり、貿易に重力モデルを初めて適用した人物だからです。しかしながら、ティンバーゲンよりはるか以前に、Ravenstein (1885) が重力方程式を移民に応用していました。ティンバーゲンの弟子の一部は 1960～70 年代に重力モデルの研究を継承しましたが、当時の大半の経済学者は理論的基礎の欠如から、重力モデルを重要な貿易モデルとは見なしていませんでした。

重力を経済学に初めて応用したのは誰かについては議論があるものの、貿易を専門とする経済学者たちは、今日知られている貿易の重力方程式に初めて理論的基礎を与えたのは、Anderson (1979) である、という点では一致しているようです。実際、多少の「表面的な」理論的改良こそあれ、アンダーソンの 1979 年の重力モデルが、現代の実証的な重力モデル分析と完全に整合的であるという点は、実に注目に値する事実です。

直感的、優れた実証性能、そして確固たる理論的基礎があるにもかかわらず、重力モデルは 1980 年代、さらには 1990 年代に至るまで、主流派の国際貿易学者から支持を得るのに苦労しました。貿易研究の指針となる『国際経済学ハンドブック (Handbook of International Economics)』に掲載された影響力のあるサーベイ論文は、重力モデルに対して好意的ではありませんでした。重力モデルの理論的系譜に疑問を呈し、国際貿易研究には何の影響も与えないだろうと予言しました。過去を振り返るなかで、Anderson (2011) は、この時期の重力モデルの経験を「知的な孤児」であったと表現しています。

2000 年代初頭まで、経済学者たちはその評判の低さから、重力モデルを無視し続けていました。この間、重力モデルは政策分析で主に使用されていました。しかし、2000 年代初頭の大きな進歩があったことで、「構造重力モデル」の黄金時代 (2002 年～2012 年) が訪れました。まず、最も重要なことは、Eaton and Kortum (2002) および Anderson and van Wincoop (2003) の画期的な理論的貢献により、重力モデルが非常に強固な理論的基礎を持つという事実が疑う余地のないものとなったことです。第二に、Frankel and Romer (1999) や Rose (2000) などの影響力のある経済学者による実証的な貢献により、重力モデルを研究に使用することに対する偏見が打ち破られ、確固とした実証的ツールとして復活を遂げました。第三に、この時期には、大規模かつ質の高い貿易データの構築と、より優れた計量経済学的手法および分析能力の確立が見られました (Baldwin and Taglioni, 2006)。

重力モデルは黄金期 (2002-2012 年) において、貿易分析の主力モデルとしての地位を確立し、応用研究、理論的発展、推定手法への貢献、新規データセットなど、数百年に及ぶ出版物に登場しました。この時期の重力モデル論文の大半は、二国間貿易フローへの様々な政策効果や決定要因 (自由貿易協定 (FTA)、世界貿易機関 (WTO) 加盟、距離、植民地関係など) を推定する実証的応用研究でした。多くの研究が依然として直感的に重力モデルを応用していた一方で、より厳密な理論への準拠により、貿易の成長要因に対する理解が深まり、推定結果の信頼性も高まりました。

重力モデルの黄金時代には理論面でも重要な進展が見

られました。例えば、部門別重力モデル、企業の異質性を考慮した重力モデル、動学的重力モデルなどです。また、重力モデルの理論とその応用への関心の高まりは、計算能力の大幅な向上に後押しされ、推定手法の新たな貢献となりました。例えば、輸出国・輸入国・国ペアごとの固定効果の導入 (次節で詳述) や、Santos Silva and Tenreyro (2006) によるポアソン擬似最尤 (PPML) 推定量の導入があります。PPML は後に最良の重力モデルの推定法としての地位を確立することになります。

Arkolakis et al. (2012) の画期的な論文において、ミクロ経済学的基礎が異なっても同一の重力方程式に収束することが示され、構造重力モデルは貿易分野における覇権を確固たるものにしました。多くの新たな応用と理論的発展が続く中で、重力モデルは 1980～1990 年代に否定された同じ出版物である『国際経済学ハンドブック (2014 年版)』で大々的に取り上げられ、見事な復活を成し遂げました。重力モデルは、2018 年版の『国際貿易・輸送ハンドブック』や、貿易政策分析やグローバル化の影響に関する専門書でも取り上げられました。

実証的の重力方程式は新たな応用分野における定番モデルであり続けた一方、研究者らは新しい優れた手法により貿易コストを測定し、貿易フローの様々な決定要因 (通貨同盟、海賊行為、共通言語、為替レート、経済制裁など) の効果を定量化することで、既存の結果を再検証しました。より良いデータ (国、部門、時間の補足率の観点で) により、多くの貿易政策 (例、地域貿易協定、通貨同盟、制裁など) の多様な次元における異質な効果を探求することが可能になりました。また、重力モデルはサービスや鉱業や農業の貿易においても、製品レベルから集計レベルに至るあらゆる集計単位でも非常に有効であることが確立されました。貿易フローの決定要因を研究するには、何らかの重力モデルに依拠すべきであることも明らかとなりました。さらに、貿易研究の進展を活用し、学者や政策立案者は貿易の重力モデルを応用して、移民、海外直接投資 (FDI)、越境特許など、貿易以外の二国間フローの研究にも利用しました。

この時期には、推定手法、データ、理論の分野でも重要な進展が見られました。推定手法の面では、PPML 推定量が重力理論と完全に整合することが示され、これにより標準的な統計ソフトウェアを用いて、特別なプログラミングなしで、包括的な貿易政策分析が可能となりました。理論面でも重要な進展がありました (例、産業連関構造を伴う重力モデル、二国間の動学を伴う重力モデルなど)。重力理論の進展は、卓越した実証性能と新たな計量経済学的計算ツールと相まって、技術普及・失業・炭素排出量など様々な経済的効果と貿易を結びつける一連の成果につながりました。理論の進展と新たな応用ニーズを支えるため、説明変数としての重力変数と、様々な集計レベルにおける国際・国内貿易フローを網羅する新世代の重力データベースが構築されています。

重力モデルのこれまでにない能力と成功は、2025 年にトランプ米大統領による頻繁な関税変更 (例、カナダに対する鉄鋼関税は 3 月 9 日午前発動され、同日午後撤廃された) への対応で明らかとなりました。重力モデルの著しい進展のおかげで、我々は真に驚くべき現象を目の当たりにしました - 貿易政策の完全な (部分均衡と一般均衡の両方) 影響をリアルタイムで分析できたのです

重力モデルの進化に関するこの要約は Yotov (2024) から作成しました。詳細な議論や参考文献は同論文を参照ください。

2. Gravity with Gravititas (重力に重みを): 構造重力モデル

この節には三つの学習目標があります。第一に、構造重力モデルの理論を紹介します。第二に、単純な重力方程式 (naive gravity equation) と構造重力方程式を比較し、両者の理論に基づく主な相違点を明らかにします。第三に、貿易のモデル化と実証的な重力方程式の推定を、理論と統合的な方法で実施するために、重要な含意について説明します。

2.1. すべての道は ... 構造重力モデルに通ず

先に述べたように、貿易の重力モデルの特筆すべき特徴の一つは、同一の重力方程式が多様なミクロ経済学の理論的基礎から導出できることです。その理論の一部は学部レベルの国際貿易の教科書でも標準的なトピックとして扱われています。(図 3 参照)。理論的重力モデルの発展に沿って、現代的な構造重力モデルを二段階に分けて紹介します。まず最初に、古典的な貿易理論に統合的な、クロスセクションの構造重力方程式を紹介します。^{*1}

$$X_{ij} = \frac{Y_i E_j}{Y} \left(\frac{t_{ij}}{T_j T_i} \right)^{-\theta} \quad (2)$$

構造重力方程式 (2) は、先に示した単純な重力方程式 (1) と比べて、理論に基づく三つの特徴で区別されます。第一に、重力定数 \tilde{G} の背後にある構造的要素として、世界の生産総額 Y があります。これは、二国間の貿易が、両国の経済規模の積が世界生産に占める割合に比例する、ということを示します。

第二に、理論的な重力方程式は、輸出国側の規模の尺度を生産額 (Y_i) とし、輸入国側の規模の尺度を支出額 (E_j) として区別します。直観的には、輸出国の規模の尺度はその生産能力であり、輸入国の規模の尺度はその消費の大きさです。重力モデルにおける規模の適切な尺度として、生産と支出を区別することの重要性は、分析の集計レベルを部門や製品などに細分化した場合により明確となります。例えば、生産の特化により、部門別の貿易不均衡 (輸出と輸入の差) が非常に大きい場合、生産と支出の区別がより重要になります。

第三に、式 (1) の貿易コスト (T_{ij}) は、式 (2) では三つの構造的要素に分解されます。具体的には、 t_{ij} は二国間の貿易フローに直接影響を与えるあらゆる二国間の貿易コスト (例、距離、関税、貿易協定、制裁など) を表します。 T_i と T_j は、それぞれ輸出国と輸入国の多国間貿易コストを表し、二国間貿易が両国の規模や直接的な二国間貿易コストだけでなく、他の貿易相手国全てとの貿易コストにも依存する事実を捉えています。したがって、これらは「多国間」貿易コストと呼ばれます。

多国間貿易コストの直観的な意味合いを強調するため、図 4 では米国とカナダを火星に転送しています。米国とカナダの経済規模 (Y_i と E_j) や、直接的な二国間の貿易コスト (t_{ij} 、例えば距離) は変わらないにもかかわらず、両国が火星に存在していた場合の方が、地球上に位置する現在よりも両国の貿易は増加すると考えられます。なぜでしょうか？

^{*1} この方程式は、重力モデルに関する最も影響力のある論文 [Eaton and Kortum \(2002\)](#) および [Anderson and van Wincoop \(2003\)](#) と統合的です。同じ表記による他の導出について興味のある読者は [Yotov et al. \(2016\)](#) を参照してください。

その答えは、火星においては米国とカナダが他の国々からより孤立するからです。つまり、米国とカナダとの貿易は、両国間の貿易コストだけでなく、他の全ての国々との貿易コストにも依存するからです。これが、単純な重力モデルと構造重力モデルの重要な違いの一つです。単純な重力モデルは（誤って）直接的な二国間の貿易コストのみが重要と仮定しますが、構造重力モデルでは多国間貿易コストも考慮します。

重力モデルの理論に基づいて、さらに二つの調整を最後に加えることで、最新の構造重力モデルを次式のように導くことができます。

図 4： 多国間貿易コスト



出所：筆者、Krugman (1995) から

$$X_{ij,t}^k = \frac{Y_{i,t}^k E_{j,t}^k}{Y_t^k} \left(\frac{t_{ij,t}^k}{T_{j,t}^k T_{i,t}^k} \right)^{-\theta^k}, \quad \forall i, j, t, k. \quad (3)$$

まず、重力モデルは任意の集計レベルで導出可能であるという調整を加えます。例えば、製品、産業、部門、そして経済全体での集計レベルなどです。これは式 (3) の上付き文字 k に反映され、特定の製品、産業、またはセクターを、 k で表します。第二の調整は下付き文字 t で、式 (3) の貿易フロー、規模変数、貿易コストの全ての項が時間とともに変動するという事実を表します。時間下付き文字は、動学的な貿易理論にも対応して、例えば、貿易自由化による貿易効果が生産要素（例、米国・メキシコ国境沿いに立地するマキラドーラ（製造工場）のような物的資本）の蓄積をもたらし得ることを意味しています。なお、上付き文字 k と下付き文字 t を省略すると、式 (3) は式 (2) と同一になります。最後に、これまでに紹介した重力モデル理論はいずれも、国際貿易 ($i \neq j$) だけではなく国内貿易 ($i = j$) にも適用できることを示唆しています。

2.2. 重力モデルの応用と推定に関する理論的含意

重力モデルの理論的基礎は、モデルの実証的な成功と計量経済学上の適切な定式化について、とても重要な含意を与えてくれます。以下では、主な理論的含意の重要性について順に説明します。

多国間貿易コスト 多国間貿易コストは、貿易政策の効果を定量化する上で二つの含意を持っています。第一に、実証的な重力モデルにおいて多国間貿易コストが適切に制御されない場合、重力方程式は世界からより孤立した国々との貿易を過小に予測し、多くの貿易相手国に囲まれた国々（例、欧州諸国）の貿易を過大に予測します。第二に、多国間貿易コストは、各国が他国へ貿易を転換する際の容易さを捉えています。この点は、現代における政策効果を定量化する上で極めて重要です。例えば、ロシアのウクライナ侵攻に対する制裁が効果を発揮しなかった主因の一つは、ロシアが中国、インド、トルコなど制裁に参加していない国に貿易を転換できた点にあります。こうした効果は多国間貿易コストによって捉えられます。別の最近の例として、2025年に米国がカナダに課した関税があ

ります。カナダは世界から相対的に距離があるために、米国の関税はカナダにとって特にダメージとなります。

細分類での重力モデル 理論上、重力モデルはあらゆる集計レベル（製品レベルから経済全体まで）で成立します。この理論的特性から導かれる主な含意は、実証的な重力モデルが非常に柔軟であり、関心のある問題に応じて、特定の製品、産業、部門、あるいはより広範な財とサービスの比較など、多様に分析の焦点を当てることができるという点です。個々の産業や部門ごとに貿易フローを分析することは重要です。なぜなら、貿易コスト（例、輸送費）は部門間で異なり、多くの貿易政策（例、関税）は細分化されたレベルで実施されるからです。政策が経済全体を対象に実施される場合（完全な貿易禁輸など）でさえ、その効果は製品、産業、部門によって大きく異なる可能性があります。したがって、細分化されたレベルに重力モデルを適用することが望ましい場合が多いと言えます。そして、重力モデル理論は、細分化された分析に対しても明確な根拠と指針を提供します。

時間変動の重力モデル 重力方程式の時間についての側面は、いくつかの実証的含意を持っています。第一に、データに多くの年を追加すると、重力モデルの分析精度が高まります。第二に、次節で示すように、パネルデータ（時間変動のデータ）を用いることで、時間について不変な全ての二国間貿易コスト（例、距離）を、柔軟かつ包括的、そして容易にモデル化できます。第三に、パネルデータを用いることで、二国間貿易コストの推移や調整、および様々な政策の効果を時間軸に沿って捉えることが可能となります。例えば、地域貿易協定（RTA）の効果は即座には現れず、RTA 締結後の時間経過とともに、貿易フローがどのように調整されるかを捉えることは政策目的において有用です。さらに、1990年代のRTAの効果は近年のRTAの効果とは大きく異なる可能性があり、その差異は時間変動データなしでは把握できません。

生産 vs 支出 重力理論による生産額と支出額の違いは、実証分析における重要な含意を持っています。第一に、貿易コストが対称的である場合（例、二国間の距離）、生産額と支出額の違いを考慮しないと、重力モデルは常に対称的な二国間貿易フローを予測してしまうため、予測精度が低下する点があります。第二に、生産と支出の違いがより重要となるのは、細分化されたレベルでの分析です。細分化されたデータでは、国内生産と消費が大きく異なることがあります。第三に、国全体で集計されたデータを用いる場合であっても、GDPは重力モデルにおける経済規模の最適な代理変数ではないためです。理論的には貿易不均衡を考慮すべきであることに加え、GDPは付加価値ベースで測定されるのに対し、貿易フローは輸出入の総額（グロス）ベースで測定されるため、不整合が生じるからです。幸いなことに、次節で示す通り、重力モデルにおける経済規模の変数を適切に扱うための非常に簡便な計量経済学的手法が存在するので、こうした測定上の課題や追加データの必要性を気にする必要はありません。

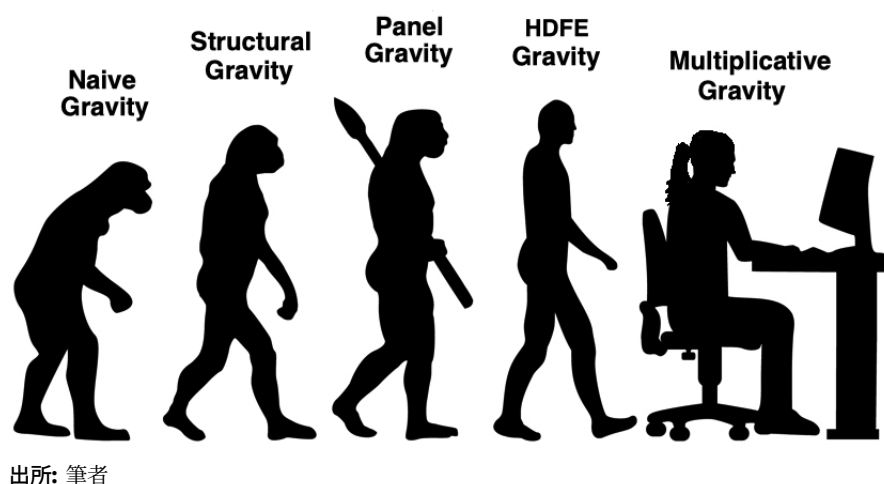
国内貿易 貿易理論によれば、重力モデルは国内取引にも適用されます。さらに、国内貿易データを用いることは重力モデルの推定において重要な利点を持っています。例えば、貿易協定により協定参加国に不参加国から貿易が転換する効果（貿易転換効果）、制裁の域外効果、非差別的貿易政策の影響など、これらの効果は国内貿易データ含めることで識別することが可能となります。しかし、主にデータ制約のため、ほとんどの重力モデルの推定は依然として国際貿易データのみを用いて行われ、国内貿易フローの利用はまだ標準的なものとはなっていません。したがって、重力モデルの既存文献と同様に、この章では国際貿易フローのみに焦点を当てることにします。

3. 単純なモデルから最新の重力モデルの推定へ

重力モデルの大きな成功は、その前例のない予測精度と多様な応用を可能とする柔軟性によるものです。この節の目的は、重力方程式の単純な実証モデルを最新の計量経済学的重力モデルに進化させることで、貿易フローを決定する多様な要因の効果を推定できるようにすることです。分析では計量経済学の基礎知識（例、最小二乗法（OLS）や固定効果）を前提としますので、この節の内容は計量経済学の講義を履修した学部生であれば理解できる内容です。また、計量経済学の授業や経済学のゼミを受講する学生、または卒業論文や自主研究プロジェクトを計画している学生にとっても役に立ちます。

この節では、重力モデルの理論的基礎とこれまでに学んだ知識を活かして、図5に示す重力モデル推定の進化の歴史に沿って、計量経済学的重力モデルの定式化を5つのステップに分けて説明します。^{*2}

図5：重力モデル推定の進化



出所：筆者

単純な重力方程式 (Naive Gravity) 前節で単純な重力方程式を構造重力モデルに変換したように、まずは単純な重力方程式の推定式を設定します。そのために、次の三つの単純な手順を進めていきます。まず、式(1)を対数線形化すると、次式になります：

$$\ln(X_{ij}) = \ln(\tilde{G}) - \theta \ln(T_{ij}) + \ln(Y_i) + \ln(Y_j). \quad (4)$$

次に、独立変数の代理変数を用いて式(4)を計量経済モデルに変換します。具体的には、経済規模をGDPで代理して、輸出国(GDP_i)と輸入国(GDP_j)とします。二国間貿易コストを代理する変数としては、二国間の距離($DIST_{ij}$)と地域貿易協定(RTA_{ij})を用います。距離と地域貿易協定(RTA)は、重力モデルの文献において貿易コストの代理変数として最も広く用いられている変数です。^{*3} 距離とRTAを貿易コストの代表的な代理変数として用いることは、教育的観点からも有益です。なぜなら、一方(距離)は連続変数で、他方(RTA)は0と1の値しか取らない指標変数(ダミー変数)だからです。具体的には、RTA変数は、ある年に二国間でRTAが発効していれば1、そうでなければ0

^{*2} 重力モデルの推定に関して推奨する事項の詳細な背景と議論については、Larch et al. (2025)を参照してください。

^{*3} 章末の演習問題では、他の貿易コスト代理変数や政策変数についても紹介します。

となる変数です。

最後に、重力定数 (\tilde{G}) に対応する定数項 (β_0) と、誤差項 (ϵ_{ij}) を加え、最初の計量経済学的重力モデルを次のように完成させます：

$$\ln(\text{TRADE}_{ij}) = \beta_0 + \beta_1 \text{RTA}_{ij} + \beta_2 \ln(\text{DIST}_{ij}) + \beta_3 \ln(\text{GDP}_i) + \beta_4 \ln(\text{GDP}_j) + \epsilon_{ij}. \quad (5)$$

式 (5) は計量経済学的重力モデルで最も一般的な形です。これは最小二乗法 (OLS) で推定可能で、得られた推定値は次のように解釈できます。連続変数 (距離と GDP) の係数の推定値は弾力性として解釈できます。例えば、距離の係数の推定値が $\hat{\beta}_2 = -0.8$ であれば、他の条件を一定とした場合、二国間の距離が 1% 増加すると、二国間貿易が 0.8% 減少することを意味します。重力モデルにおける任意の指標変数 (例、RTA) の影響を解釈するには、次の式 $[\exp(\beta_1) - 1] \times 100$ が使えます。例えば、RTA に関する重力モデルの推定値が $\hat{\beta}_1 = 0.5$ であった場合、分析対象期間中に発効した RTA が、RTA 加盟国間の貿易を約 65% 増加させたことを意味します。 ($[\exp(0.5) - 1] \times 100 = 64.87$)。これは、他の条件が一定である場合 (ceteris paribus) の推計値です。

構造重力モデル (Structural Gravity) 次に、式 (2) の理論的含意を取り入れることで計量経済学的重力モデルの設定を改良します。つまり、理論モデルで議論した二つの点を考慮する必要があります。第一に、生産額と支出額を計測する必要があるという点です。第二に、多国間貿易コストを考慮する必要があるという点です。原則として、観察可能なデータを利用することで、両方の点について直接対処することが可能です。しかしながら、(i) 生産額と支出額、(ii) 多国間貿易コストに対処するための簡単に理論に整合的そして包括的な計量経済学的アプローチは、輸出国と輸入国の固定効果を導入した次の推定式です：

$$\ln(\text{TRADE}_{ij}) = \beta_0 + \beta_1 \text{RTA}_{ij} + \beta_2 \ln(\text{DIST}_{ij}) + \pi_i + \psi_j + \epsilon_{ij}. \quad (6)$$

ここで、 π_i は輸出国の固定効果の集合、すなわちデータ内の各輸出国に対して 1 を値に取るダミー変数であり、 ψ_j は輸入国の固定効果の集合、すなわちデータ内の各輸入国に対して値 1 を取るダミー変数です。例えば、データに 100 カ国が含まれていて、それぞれが輸入国としても輸出国としても現れる場合、100 個の輸入国固定効果と 100 個の輸出国固定効果を導入することになります。^{*4} 固定効果を導入する主な利点は、次のとおりです。(i) 経済規模や多国間貿易コストも含めて、輸出国と輸入国それぞれに固有の特性 (観測可能・不可能を問わず) を完全に制御できます。したがって、輸出国や輸入国に関してデータが欠落することや、データ収集について心配する必要がないということです。そして、(ii) 標準的な統計ソフトウェアを用いれば、実証的に設定・実装することはとても簡単です。実装方法は次節で説明します。一方で、固定効果を使うことの欠点は、輸出国や輸入国に固有な変数の効果が識別できなくなる点です。それらの固有な変数は固定効果と完全な多重共線性を示し、固定効果に吸収されてしまうからです。しかし、二国間貿易コストや政策 (例、距離や RTA) 効果の推定に対して、この制約は影響しません。

^{*4} 厳密には、完全な多重共線性を避けるため、輸出国側と輸入国側の固定効果のうち、それぞれ 1 つが除かれます。ただしこの処置は、我々が注目する独立変数の推定値に影響を与えません。

パネル重力モデル (Panel Gravity) 次のステップはシンプルに、(6) 式の推計モデルに時間次元を導入します。その結果、誤差項および全ての変数（時間とともに変化しない距離を除く）には、下付き文字の時間 t が付与されます：

$$\ln(\text{TRADE}_{ij,t}) = \beta_0 + \beta_1 \text{RTA}_{ij,t} + \beta_2 \ln(\text{DIST}_{ij}) + \pi_{i,t} + \psi_{j,t} + \epsilon_{ij,t}. \quad (7)$$

前節で説明したように、貿易の計量経済分析に時間次元を加えることは理論と整合的です。そして、より多くのデータを用いることで、計量経済学的重力モデルの性能が向上します。さらに、時間次元を加えることで、RTA 発効前後の効果の推移や、異なる時点で締結された RTA（例、1990 年代の RTA と 2000 年代の RTA）の効果の違いを比較することが可能となります。

高次固定効果重力モデル (HDFE Gravity) パネルデータを用いることで、国ペア固定効果 (γ_{ij}) を導入することが可能になりました。非常に多くの固定効果を扱うため、この定式化は高次元の固定効果 (HDFE: High-Dimensional Fixed Effects) 付き重力モデルと呼ばれます。国ペア固定効果は、データに含まれる各国ペアに対して値 1 を取り、それ以外では値 0 となる指標変数 (ダミー変数) です。HDFE 重力モデルは次式になります：

$$\ln(\text{TRADE}_{ij,t}) = \beta_0 + \beta_1 \text{RTA}_{ij,t} + \gamma_{ij} + \pi_{i,t} + \psi_{j,t} + \epsilon_{ij,t}. \quad (8)$$

輸出国および輸入国の固定効果と同様に、国ペア固定効果は距離や国境の隣接性など、時間とともに変化しない全ての二国間貿易コストを完全に制御することになります。国ペア固定効果を使用する場合の欠点は、距離やその他の時間不変の二国間変数の効果が推定できなくなる点です。したがって、式 (8) では、国ペア固定効果に吸収されるため、 $\ln(\text{DIST}_{ij})$ は含まれなくなります。しかし、関税、地域貿易協定 (RTA)、制裁措置など、時間変動する政策の効果の推定を得ることが目的である限り、重力モデル推定において国ペア固定効果の使用は強く推奨されます。というのも、国ペア固定効果の導入により、多くの潜在的な欠落変数を制御できるだけでなく、広範なデータ収集の必要性も制限しつつ、重力モデルの予測力が大幅に改善するからです。この点については、次節の実習分析で特に注意して確認します。

乗法重力モデル (Multiplicative Gravity) 最後のステップでは、最適な計量経済モデルを導くため、対数線形化した重力モデルでは二国間貿易フローがゼロの場合そのデータを除外する、という課題に対処する必要があります（なぜなら、ゼロの対数は定義されないためです）。計量経済学的重力モデルでのシンプルな対処は、両辺に指数関数を取ることです。その結果、次式を得ることができます：

$$\text{TRADE}_{ij,t} = \exp [\beta_0 + \beta_1 \text{RTA}_{ij,t} + \gamma_{ij} + \pi_{i,t} + \psi_{j,t}] \times \epsilon_{ij,t}. \quad (9)$$

乗法重力モデルにはさらに二つの特徴があることで、モデルの魅力を高めています。第一に、次節で示すように、乗法重力モデルは標準的な統計パッケージに組み込まれた高速なコマンドを用いることで、容易かつ迅速に推定することができます。第二に、重力係数の推定結果の解釈が、OLS で推定される対数線形型と同様にできることです。

式 (9) は、学術研究者や政策分析者が各種の政策効果を推定する際に用いている、最新の計量経済学的重力モデルの定式化となっています。式 (9) に基づき、Box 5 では、理論的な重力モデルの含意と実証モデルでの実装との関係をまとめています。

Box 5. 理論から推定へ

理論的含意	実証での実装
生産額 vs 支出額の制御	輸出国 (× 年) と輸入国 (× 年) 固定効果
多国間貿易コストの制御	輸出国 (× 年) と輸入国 (× 年) 固定効果
時間不変な二国間貿易コストへの対処	国ペア固定効果 (または 時間不変変数)
時間変動する二国間貿易コストへの対処	パネルデータや時間変動する政策変数
ゼロ貿易フローへの対処	乗法 PPML 推定量

話を先に進める前に、思い出してほしいことは、重力モデルはあらゆる集計レベルで、理論と統合的に応用できるということです。そのため、式 (9) は製品単位、産業単位、部門単位、あるいは国全体の集計データを用いて推定することができます。特に重要なのは、式 (9) は標準的な統計ソフトウェアを用いて簡単に実装し推定ができることです。次の節では、シンプルでありながらも最先端の重力モデルを例として、実際に推定を行います。

4. 重力モデルの実習: 距離と地域貿易協定と EU の効果

この節では、これまでに説明した推定式を順番に、実際に推定コマンドを実行して結果を分析する実習を行います。前節との違いは、距離と地域貿易協定 (RTA) の効果を推定するだけでなく、欧州連合 (EU) の効果を他の RTA から分離して推定することです。そのため、推定式に新たな指標変数 (ダミー変数) $EU_{ij,t}$ を導入します。このダミー変数は、国 i と国 j が年 t に EU 加盟国である場合に 1 をとり、そうでない場合は 0 となる変数です。したがって、RTA 変数には他のすべての地域貿易協定が含まれますが、EU は含まれないので、それぞれを分けて考察することができます。EU を分けることには四つの理由があります。第一に、EU 加盟が貿易に与える効果は、学術的にも政策的にも重要な関心事だからです。第二に、EU の効果は他の RTA の効果とは異なり、より強いと予想されるからです。第三に、異なる貿易協定の効果を分離して識別する手法の一例だからです。^{*5} 第四に、方法論の観点から、EU は密接に統合された国々の集合の例だからです。重力モデルの理論で述べたように、多国間貿易コストが EU の効果推定に大きく影響することを意味しています。

この節の実証分析ではソフトウェアの Stata を用いています。推定結果を得るために必要な全てのコマンドと、分析の背景と結果の解釈も含めて説明しています。全てのコマンドと推定に使用したデー

*5 章末の演習問題では他の例も紹介しています。

タセットをまとめた「do」ファイルは、https://yotoyotov.com/Gravity_Undergrads.html から入手可能です。重要な点として、紹介する推定方法は他の標準的な（かつ無料の！）統計パッケージ R でも簡単に実装できます。したがって、より進んだ学部学生であれば誰でも利用できます。さらに、簡単に利用ができるように、ウェブサイトには R のデータとコードも掲載しています。

重力モデルデータ この章の付録として、最新（2025年3月時点）の貿易・政策・重力モデル関連データを集めた『学部生のための重力モデル (GU)』データベースを構築しました。このデータベースは、学術研究者や政策立案者も利用するデータから構成されています。そのため、この節の実証分析と章末の演習問題で使用するデータは、実際の政策分析や研究プロジェクトの応用に適しています。GU データセットには、世界の輸出総額の 98.9%、輸入総額の 97.7%、GDP 総額の 98.3% を占める世界の上位 100 の輸出国を対象として、1990 年から 2023 年までの貿易と重力モデルの変数が含まれています。以下のリストには、分析で使用する変数とその概要とデータソースを記載しています。その他の変数については、章末の演習問題で説明します。

Exporter	輸出国 i の ISO 国コード、ID 変数
Importer	輸入国 j の ISO 国コード、ID 変数
Year	1990 年から 2023 年までの年 t 、ID 変数
Trade	年 t における国 i と国 j の間の二国間貿易額（名目/米ドル建て） 出所：UN COMTRADE データベース (https://comtradeplus.un.org/)
Distance	国 i と国 j の間の人口で重み付けした距離（km） 出所：USITC DGD データベース (https://www.usitc.gov/data/gravity/dgd.htm)
RTA	年 t において国 i と国 j の間に地域貿易協定（RTA）が存在するかを示す指標 出所：Mario Larch's データベース (https://www.ewf.uni-bayreuth.de/en/research/RTA-data/)
EU	年 t において国 i と国 j がともに EU 加盟国であるかを示す指標 出所：筆者、欧州委員会データ
GDP_Exporter	輸出国 i の年 t における GDP（名目/米ドル建て） 出所：世界銀行 WDI データベース (https://datacatalog.worldbank.org/home)
GDP_Importer	輸入国 j の年 t における GDP（名目/米ドル建て） 出所：世界銀行 WDI データベース (https://datacatalog.worldbank.org/home)

図 6 は、『学部生のための重力モデル (GU)』データベースの一部を抜粋して示しています。3 カ国（カナダ、メキシコ、米国）および 3 年間（1993-1995 年）が表示されています。このデータをよく見ると、3 カ国間の貿易規模が大きく、非対称的であり、時間とともに変動していることが分かります。構造上、各国ペア間の距離は対称になっています。RTA 変数は、1989 年のカナダ・米国貿易協定により、全ての年度においてカナダと米国のペアに対して 1 となっています。一方、米国とメキシコ、カナダとメキシコの RTA 変数は、北米自由貿易協定（NAFTA）により 1994 年に 0 から 1 に変化しています。EU 変数は常にゼロです。3 カ国は EU 加盟国ではないためです。GDP 変数は各国の経済規模の差を捉えています。最後に、この固定効果を明示的に作成・追加する必要はありませんが、図 6 には固定効果の 4 つの例が含まれています。CAN_exp_1993 は、1993 年のカナダを対象にした輸出国固定効果です。USA_imp_1995 は、1995 年の米国の輸入国固定効果です。CAN_MEX はカナダからメキシコへの輸出に関する国ペア固定効果、MEX_CAN はメキシコからカナダへの輸出に関する国ペア固定効果です。

図 6: GU データベースの構造

	Exporter	Importer	Year	Trade	Distance	RTA	EU	GDP_Exporter	GDP_Importer	CAN_exp_1993	USA_imp_1995	CAN_MEX	MEX_CAN
1	CAN	MEX	1993	9.882e+08	3472.085	0	0	5.791e+11	5.302e+11	1	0	1	0
2	CAN	MEX	1994	1.620e+09	3472.085	1	0	5.799e+11	5.536e+11	0	0	1	0
3	CAN	MEX	1995	1.374e+09	3472.085	1	0	6.060e+11	3.802e+11	0	0	1	0
4	CAN	USA	1993	1.136e+11	2134.945	1	0	5.791e+11	6.859e+12	1	0	0	0
5	CAN	USA	1994	1.319e+11	2134.945	1	0	5.799e+11	7.287e+12	0	0	0	0
6	CAN	USA	1995	1.483e+11	2134.945	1	0	6.060e+11	7.640e+12	0	1	0	0
7	MEX	CAN	1993	2.785e+09	3472.085	0	0	5.302e+11	5.791e+11	0	0	0	1
8	MEX	CAN	1994	3.274e+09	3472.085	1	0	5.536e+11	5.799e+11	0	0	0	1
9	MEX	CAN	1995	3.901e+09	3472.085	1	0	3.802e+11	6.060e+11	0	0	0	1
10	MEX	USA	1993	4.072e+10	2492.907	0	0	5.302e+11	6.859e+12	0	0	0	0
11	MEX	USA	1994	5.033e+10	2492.907	1	0	5.536e+11	7.287e+12	0	0	0	0
12	MEX	USA	1995	6.275e+10	2492.907	1	0	3.802e+11	7.640e+12	0	1	0	0
13	USA	CAN	1993	8.804e+10	2134.945	1	0	6.859e+12	5.791e+11	0	0	0	0
14	USA	CAN	1994	1.002e+11	2134.945	1	0	7.287e+12	5.799e+11	0	0	0	0
15	USA	CAN	1995	1.098e+11	2134.945	1	0	7.640e+12	6.060e+11	0	0	0	0
16	USA	MEX	1993	4.832e+10	2492.907	0	0	6.859e+12	5.302e+11	0	0	0	0
17	USA	MEX	1994	5.481e+10	2492.907	1	0	7.287e+12	5.536e+11	0	0	0	0
18	USA	MEX	1995	5.397e+10	2492.907	1	0	7.640e+12	3.802e+11	0	0	0	0

出所 筆者『学部生のための重力モデル (GU)』データベース

図 6 の抜粋には 18 個の観測値が含まれています。これは 3 カ国が存在し、それぞれが 3 年間で他の 2 カ国と輸出入を行っているためです。つまり、 $(3 \text{ か国}) \times (2 \text{ 相手国}) \times (3 \text{ 年}) = 18$ となります。したがって、全ての国ペア・全ての年についてデータ利用が可能であれば、GU データセットの観測値数は $100 \times 99 \times 34 = 336,600$ となります。しかし実際には、GU データは完全なパネルデータではありません。例えば、旧ソ連の国々は 1990 年代初頭には独立しておらず、貿易や GDP データは後年のものしか入手できないためです。結果として、GU データセットの観測数は 320,920 件となっています。

計量経済分析を進める前に、一部の変数（貿易、距離、GDP）を対数変換する必要があります。これは以下の簡単な Stata コードで実行できます：

```
generate ln_trade=ln(Trade)
generate ln_dist=ln(Distance)
generate ln_gdp_exp=ln(GDP_Exporter)
generate ln_gdp_imp=ln(GDP_Importer)
```

単純な重力モデルの推定 以下の Stata コマンドは、式 (5) に対応するシンプルな最小二乗法 (OLS) の設定で、最も「伝統的」（だが「単純」）な重力モデルの推定値を得ることができます：

```
regress ln_trade ln_dist RTA EU ln_gdp_exp ln_gdp_imp if Year==2023
```

このコマンドの内容を見てみましょう。regress は OLS 推定の標準的な Stata コマンド、ln_trade は従属変数、ln_dist、RTA、EU、ln_gdp_exp、ln_gdp_imp は独立変数です。最後に、if year==2023 というコマンドは、推定を単一年（2023 年）に限定して実行することを意味します。この年の指定は、データ内の任意の他の年（1990 年から 2023 年までのいずれかの年）に変更可能です。

単純な重力モデルの推定結果は表 1 の列 (1) で示しています。全体として、予想通りの結果となっています。この結果には、五つの注目点があります。第一に、距離が貿易に及ぼす効果の推定値は負で統計的に有意であり、距離が 1% 増加すると貿易量が 1.179% 減少することを示しています。第二に、地域貿易協定 (RTA) と EU の効果の推定値はいずれも正で統計的に有意です。RTA の推定値は、他の条件が同じであれば、RTA 加盟国間の貿易が 94 % (計算式: $[exp(0.664) - 1] \times 100 = 94.25$) 増加したことを示しています。第三に、EU は高度な経済統合であるため、EU の貿易への効果がさらに大きいことは驚くべきことではありません (RTA 効果の計算例を用いて、EU 加盟国間の EU による貿易増加分を算出できますか?) 第四に、GDP 効果は輸入国と輸出国双方で大きく正で統計的に有意な推定値であることから、経済規模と貿易量の強い正の相関関係が確認できます。最後に、 $R^2 = 0.64$ という結果から、単純な重力モデルはわずか 5 つの説明変数で、高いあてはまりを示しています。

表 1: 重力モデル推定の進化

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	Naive Gravity	Structural Gravity	Panel Gravity	HDFE Gravity	Multiplicative Gravity
ln_dist	-1.179 (0.032)**	-1.473 (0.034)**	-1.583 (0.006)**		
RTA	0.664 (0.049)**	0.236 (0.051)**	0.147 (0.010)**	0.103 (0.013)**	0.076 (0.012)**
EU	0.900 (0.112)**	-0.261 (0.117)*	-0.526 (0.022)**	0.427 (0.030)**	0.273 (0.024)**
ln_gdp_exp	1.352 (0.015)**				
ln_gdp_imp	1.143 (0.015)**				
Constant	-37.864 (0.600)**				
<i>N</i>	9564	9564	288085	288085	320920
R^2	0.643	0.759	0.772	0.897	

注：各モデルの詳細については、本文を参照してください。

出所：筆者。括弧内に標準誤差を記載。+ $p < 0.10$, * $p < .05$, ** $p < .01$

構造重力モデルの推定 構造重力モデル (式 6) を推定するために、先ほどの推定コマンドに対して二つ変更を加えます：

```
reghdfe ln_trade ln_dist RTA EU if Year==2023, absorb(Exporter Importer)
```

第一に、`reghdfe` コマンドを使用します。^{*6} さきほど使用した標準的な `regress` コマンドを使用しても全く問題ありませんが、ここでは `reghdfe` コマンドを推奨します。多数の固定効果を容易に扱うためであり、これが推定コマンドの二つ目の変更点です。具体的には、オプション `absorb(Exporter Importer)` を指定することで、輸出国固定効果 (Exporter) および輸入国固定効果 (Importer) を導入します。この設定により、輸出国側 (例：生産) と輸入国側 (例：支出) の観測可能な特徴はもちろん、観測が不可能な特徴も制御できることに加え、二国間貿易に影響する多国間貿易コストをも制御することができます。その結果、表 1 の列 (2) に示される推定結果では、GDP が貿易に及ぼす効果の推定値は含まれなくなります。^{*7}

列 (1) と列 (2) の推定結果には四つの重要な違いがあります。第一に、列 (2) における距離の効果の推定値は依然として負で統計的に有意ですが、絶対値はより大きくなっています。第二に、EU の効果は大幅に縮小し、むしろ負の値となっています。この結果は前節で論じた多国間貿易コストの理論的含意と一致します。つまり、理論が予測するように、多国間貿易コストを制御すると EU の効果は著しく小さくなります。第三に、RTA の効果も縮小していますが、依然として正の値で統計的有意性を保っています。最後に、列 (2) の R^2 はより大きくなっています。これは当然の結果で、輸出国と輸入国の貿易フローに関する観測可能なものと観測不可能な決定要因の全てを、輸出国および輸入国固定効果を導入してコントロールしたからです。

パネル重力モデルの推定 さきほどの推定コマンドに、さらに二つの変更を加えることで、式 (7) に対応したパネル重力モデルを推定します：

```
reghdfe ln_trade ln_dist RTA EU, absorb(Exporter#Year Importer#Year)
```

まず、データ内の全ての年を使用するため、`'if year==2023'` というコマンドを削除します。次に、固定効果が時間とともに変動することを考慮して、輸出国 × 年 (Exporter#Year) および輸入国 × 年 (Importer#Year) の固定効果を導入します。この設定における固定効果の次元は、パネル重力モデル (3) の理論的構造と整合的です。そのため輸出国と輸入国それぞれに特有な変数 (経済規模と多国間貿易コスト) が時間とともに変動することになります。

推定結果は表 1 の列 (3) に示されています。まず、期待通り、列 (3) の観測数 (N) が非常に大きくなっています。関連して、より多くのデータを使用したため、列 (3) の標準誤差は小さくなっています。距離の効果の推定値は、列 (2) のクロスセクション推計の結果と同程度です。地域貿易協定 (RTA) 効果の推定値は小さくなったものの、依然として正で統計的に有意です。しかし、列 (3) における EU の推定値は大きく、負で統計的に有意です。この結果は政策の観点からはとても驚くべき結果です。しかし、方法論の観点からは驚くべきことではなく、その説明として、このパネル重力モデルの設定では、潜在的に重要な二国間貿易コストの多くが考慮されていないことが挙げられます。この問題は次の設定で解決されます。

^{*6} 本章で使用する高次固定効果推定用の高速コマンドである `reghdfe` コマンドと `ppmlhdfe` コマンドは、それぞれ [Correia \(2016\)](#) および [Correia et al. \(2020\)](#) によるものです。

^{*7} 固定効果を導入すると、定数項の推定値は標準的な意味を持たなくなるので、表示を省略します。

高次固定効果 (HDFE) 重力モデルの推定 パネル重力モデルに、国ペア固定効果を導入する変更を加えます。これは、推定コマンドの `absorb` オプションで簡単に変更できます。輸出国 × 年と輸入国 × 年の固定効果に加え、輸入国と輸出国との国ペア固定効果 `Importer#Exporter` を追加します。推定コマンドは次のようになります：

```
reghdfe ln_trade RTA EU, absorb(Exporter#Year Importer#Year Importer#Exporter)
```

新しい推定コマンドでは変数 `ln_dist` が消えていることに注意してください。その理由は、国ペア固定効果を導入すると、距離を含むあらゆる時間不変の二国間貿易コストを吸収して完全に制御するためです。二国間貿易コストの多くが地理的要因によって決定される限り、国ペア固定効果は測定困難あるいは観測すら不可能な多数の変数を制御する強力な計量経済学的ツールとなります。これにより、EU や地域貿易協定 (RTA) など、二国間で時間的に変動する政策変数に焦点を当てることが可能となります。ただし、時間不変な貿易フローの決定要因 (距離、国境の隣接性、共通言語など) の効果を分析対象とする場合には、推定を妨げることになるため、国ペア固定効果は使用できません。この点に関する分析は、章末の演習問題で取り上げます。

国ペア固定効果を用いた推定結果は表 1 の列 (4) に示されています。この重力モデルの設定では、EU 効果の推定結果が大きく異なります。EU 効果の推定値は、予想通り、大きく正で統計的に有意です。RTA の推定値は以前よりやや小さくなりましたが、依然として正で統計的に有意です。前述の通り、政策効果の推定値が変化した理由は、(1), (2), (3) の設定では重要な時間不変な独立変数を除外していたためであり、(4) では国ペア固定効果によって完全に制御されるからです。したがって、分析対象が二国間の政策変数 (RTA、EU 加盟、関税、制裁など) の効果である限り、国ペア固定効果を用いた設定が強く推奨されます。国ペア固定効果の使用により、モデル全体の当てはまりがさらに向上して $R^2 = 0.9$ となっています。

乗法重力モデルの推定 最後に、重力モデルを乗法形式 (multiplicative form) で推定します。対応する推定コマンドは次のようになります：

```
ppmlhdfe Trade RTA EU, absorb(Exporter#Year Importer#Year Importer#Exporter)
```

乗法形式の重力モデルを推定するために必要な二つの簡単な変更は、(i) `reghdfe` コマンドを `ppmlhdfe` コマンドに置き換えること、そして (ii) 貿易フローを対数ではなく貿易額の水準で用いることです。つまり、貿易フローの対数 `ln_trade` ではなく `Trade` を使用します。新しい `ppmlhdfe` コマンドは、OLS 推定量ではなく、乗法 PPML (ポアソン擬似最尤：Poisson Pseudo Maximum Likelihood) 推定量を使用することを意味しています。PPML 推定量は、乗法形式であるために、データ内の貿易額がゼロである観測値に対処できることや、OLS に比べて計量経済学的な利点を持っている

るため、重力モデルを推定する標準的な手法として確立されています。^{*8} 重要な点として、推定値の解釈は PPML を用いた場合でも変わらないことです。さらに、近年の計算能力の進歩により、PPML は頑健で高速な推定法となっています。

重力モデルの最後の推定結果は、表 1 の列 (5) に示されています。乗法重力モデルによる RTA 効果の推定値は 0.076 であり、これは分析対象期間中に発効した RTA が、他の条件が同じであれば、RTA 加盟国間での貿易が約 8 % 増加することを意味します。EU の推定値は、約 31 % 相当の効果を示しています。政策変数の RTA と EU の推定値はやや小さいように見えますが、以下の点に留意すべきです。第一に、国ペア固定効果を用いたため、推定値は 1990 年以降に発効した RTA と、1990 年以降に加盟した EU 加盟国の効果のみを捕捉している点です。第二に、EU と RTA の両方の効果は、加盟国間での異質性が大きい可能性があります。RTA の異質性については、章末の演習問題で取り上げます。最後に、列 (5) には R^2 が報告されていない点に注意してください。^{*9} 代わりに、モデルの全体的な当てはまりを評価するには、この推定結果から得られた図 2 を参照してください。

最後に これまでに議論してきた乗法重力モデルの意味、動機、そして含意を理解できたなら、あなたは大きな進歩を遂げたこととなります。そして、自分を誇りに思ってください。章末の演習問題で示す通り、推定コマンドに適切な独立変数を追加するだけで、時間変動するさまざまな二国間政策（制裁や関税同盟など）が貿易に及ぼす効果を推定できるようになります。さらに、貿易フローの時間不変な決定要因（距離、植民地関係、共通公用語など）の効果に興味がある場合は、国ペア固定効果の代わりに、対応する変数を組み込むことができます。まとめると、最新の実証的な重力モデルを用いて、多くの政策が貿易フローに与える効果を研究する準備が整ったと言えるでしょう。

この章を終える前に、計量経済学的な重力モデルについて説明していない要素が一つ残っています。それは重力モデル推定における標準誤差の取り扱いです。次の三つの理由から説明をしませんでした。第一に、この章の目的としてやや高度すぎるテーマであること。第二に、この問題に対処する確立された手法が存在しないこと。第三に、独立変数の係数推定値は変化しない一方、対応する標準誤差は増減する可能性があります。多くの場合、結果に生じる差異は僅かであることです。したがって、詳細には触れませんが、重力モデルの推定コマンドの最後に `cluster(Exporter#Importer)` というオプションを追加することを推奨します。著名な計量経済学者たちの間でもまだ合意が得られていませんので、この点について心配する必要はありません。もしこのオプションを使用した理由を問われたら、「Yotov が推奨していた！」と返答すれば良いです。

^{*8} 重力モデルの推定における PPML の魅力的な特性に関する詳細な議論については、Santos Silva and Tenreyro (2006) と Larch et al. (2025) を参照してください。

^{*9} 非線形である PPML 推定量が「擬似 R^2 」を生成するため、従来の OLS による R^2 とは比較できないためです。参照 <https://www.statalist.org/forums/forum/general-stata-discussion/general/1528609-ppmlhdfe-pseudo-r2> を参照してください。

参考文献

- Anderson, James E.** 1979. "A Theoretical Foundation for the Gravity Equation." *American Economic Review* 69 (1): 106–116.
- Anderson, James E.** 2011. "The Gravity Model." *Annual Review of Economics* 3 133–160.
- Anderson, James E., and Eric van Wincoop.** 2003. "Gravity with Gravitas: A Solution to the Border Puzzle." *American Economic Review* 93 (1): 170–192.
- Arkolakis, Costas, Arnaud Costinot, and Andrés Rodríguez-Clare.** 2012. "New Trade Models, Same Old Gains?" *American Economic Review* 102 (1): 94–130.
- Baldwin, Richard E., and Daria Taglioni.** 2006. "Gravity for Dummies and Dummies for Gravity Equations." *NBER Working Paper No. 12516*.
- Correia, Sergio.** 2016. "A Feasible Estimator for Linear Models with Multi-Way Fixed Effects." *unpublished manuscript available at <http://scorreia.com/research/hdfe.pdf>*.
- Correia, Sergio, Paulo Guimarães, and Thomas Zylkin.** 2020. "Fast Poisson Estimation with High-Dimensional Fixed Effects." *The Stata Journal* 20 (1): 95–115. [10.1177/1536867x20909691](https://doi.org/10.1177/1536867x20909691).
- Eaton, Jonathan, and Samuel Kortum.** 2002. "Technology, Geography and Trade." *Econometrica* 70 (5): 1741–1779.
- Frankel, J.A., and D. Romer.** 1999. "Does Trade Cause Growth?" *American Economic Review* 89 (3): 379–399.
- Krugman, Paul.** 1995. "Increasing Returns, Imperfect Competition and the Positive Theory of International Trade." In *Handbook of International Economics*, edited by Grossman, G. M., and K. Rogoff Volume 3. Chap. 24 1243–1277, Elsevier.
- Larch, Mario, Serge Shikher, and Yoto Yotov.** 2025. "Estimating Gravity Equations: Theory Implications, Econometric Developments, and Practical Recommendations." Working Papers 2025001, Center for Global Policy Analysis, LeBow College of Business, Drexel University, <https://ideas.repec.org/p/drx/wpaper/2025001.html>.
- Ravenstein, Ernest George.** 1885. "The Laws of Migration: Part 1." *Journal of the Statistical Society of London* 48 (2): 167–235.
- Rose, Andrew K.** 2000. "One money, one market: the effect of common currencies on trade." *Economic Policy* 15 (30): 08–45.
- Santos Silva, João M.C., and Silvana Tenreyro.** 2006. "The Log of Gravity." *Review of Economics and Statistics* 88 (4): 641–658.
- Tinbergen, Jan.** 1962. *Shaping the World Economy: Suggestions for an International Economic Policy*. New York: The Twentieth Century Fund.
- Yotov, Yoto V.** 2024. "The evolution of structural gravity: The workhorse model of trade." *Contemporary Economic Policy* 42 (4): 578–603.
- Yotov, Yoto V., Roberta Piermartini, Jose-Antonio Monteiro, and Mario Larch.** 2016. *An Advanced Guide to Trade Policy Analysis: The Structural Gravity Model*. Geneva: UNCTAD and WTO.

演習問題

この演習問題は、次の目的を念頭にデザインしています。第一に、本章で扱った内容とツールの理解を強化すること。第二に、実際に練習することでコーディングスキルを上げること。第三に、現実的な政策への応用例を多く提供することです。問題は易しいものから難しいものへ難易度順に並べられています。各問題は独立しているので、それぞれを解くことが可能（かつ推奨）です。一部の問題は複数のパートに分かれており、各パートの解答には数行のコードで十分です。全ての問題に必要なデータは『学部生のための重力モデル (GU)』データベースのみです。

1. 物理学と貿易. 『学部生のための重力モデル (GU)』データベースの、2023 年の輸出国と輸入国の GDP、そして距離を使用します。本文で示した単純な重力モデル式 (1) に従って 2 国間貿易フローを計算してください。貿易関連の既存文献と整合的となるように、距離に対する貿易の弾性は $\theta = -1$ と仮定します。さらに、計算結果の貿易フローと実際の貿易フローの相関に関心があるので、貿易における重力定数を $\tilde{G} = 1$ と仮定します。単純な重力モデルから計算した貿易フローと、データベースに収録されている実際の貿易フローの相関を計算します。相関係数の値は？ 次に、二つの変数の平均値を比較してください。平均値の違いを説明する要因は何ですか？

2. クロスセクション推定値の経年変化. GU データを使用して、第 4 節の単純な重力モデル (表 1 の列 (1)) を 1990 年、2000 年、2010 年そして 2020 年のそれぞれについて推定してください。年の経過により、5 つの独立変数の推定値がどのように変化したか議論してください。(ヒント：4 つの独立した方程式を推定するか、ループコマンドで記述することができます。)

3. 標準的な重力モデルの変数. 時間不変の貿易コストを測るために最も広く用いられる 4 つの代理変数は、学術的な文献によると、二国間距離の対数、国境が接しているどうかの隣接性、共通公用語、過去の植民地関係の有無です。この問題では、GU データベースを用いて、これらの「標準的」な重力モデル変数が貿易に及ぼす効果を推定します。

3.a. 第 4 節の乗法重力モデル (表 1 の列 (5)) を使用します。変数 `ln_dist`、`Contiguous_Border`、`Common_Language`、`Colonial_Ties` を推定コマンドに追加して実行してみてください。これらの変数の効果を推定できますか？ その理由は？

3.b. 次に、推定コマンドから国ペア固定効果を削除して実行してみてください。この推定の設定では、国ペア固定効果として考慮される要因は何ですか？ 問 3.a. の新しい共変量の推定値を得られますか？ 新しい推定値を符号と大きさの観点から解釈してください。

4. **関税同盟の効果.** 関税同盟は地域貿易協定 (RTA) の一形態であり、その加盟国は非加盟国との貿易において共通した対外貿易政策を採用します。したがって関税同盟は「より深い」RTA であり、その性質上、一般的な RTA よりも貿易を促進する効果が期待されます。この問題では、この仮説を検証するため、GU データベースを使用します。

4.a. GU データを呼び出し、変数 `Customs_Union` を追加した後、第 4 節の乗法重力モデル (表 1 の列 (5)) を推定します。`Customs_Union` の推定値を解釈し、議論してください。

4.b. 定義上、関税同盟は地域貿易協定 (RTA) であるため、RTA 変数には既に関税同盟が含まれています。したがって、問 4.a における `Customs_Union` の推定値は、RTA の推定値からの乖離として解釈すべきです。関税同盟の効果を水準で推定するには、`Customs_Union` が 1 のときに RTA ダミー変数を 0 に設定します。その後、問 4.a のモデルを再推定します。問 4.a と問 4.b における `Customs_Union` の推定値を比較し、新たな推定値を解釈してください。

5. **貿易制裁の効果.** 経済制裁は現代の外交術 (statecraft) において不可欠な手段となっています。この問題では、GU データベースを用いて完全な貿易制裁の効果を推定し、ロシアに対する制裁の効果を分離して分析します。

5.a. GU データを用いて、変数 `Trade_Sanction` を追加した後、第 4 節の乗法重力モデル (表 1 の列 (5)) を推定します。制裁の効果に関する推定結果を解釈し、議論してください。

5.b. 問 5.a の設定を変更することで、ロシアに対する制裁効果を分離します。そのため、変数 `Trade_Sanction` を利用して、ロシア制裁用の新しい変数 `Russia_Sanction` を作製します。これはロシアが貿易制裁の対象である場合に値 1 をとり、そうでない場合は 0 となるダミー変数です。次に、`Russia_Sanction` が 1 の場合に `Trade_Sanction` を 0 に設定します。変数 `Russia_Sanction` を、問 5.a に追加して推定します。結果の解釈をしてください。

5.c. ウクライナ侵攻に伴う 2022 年の対ロシア制裁の効果を分離します。問 5.b で使用した変数 `Russia_Sanction` を 2 つの変数に分割します。2022 年以前の制裁を表す `Russia_Sanction_Old` と、2022 年に課された制裁を表す `Russia_Sanction_New` とします。次に、ロシア制裁変数 `Russia_Sanction` を、新たに作成したロシア制裁を表す 2 つの変数に置き換えて、5.b のモデルを推定します。結果について議論と解釈をしてください。

6. RTA 効果の不均一性 この章で推定したの RTA 推定値 (表 1) はモデルごとに一つの値でしたが、多数存在する RTA の効果は相当に異なることを隠している可能性があります。この問題では、GU データベースを使用して RTA 効果の不均一性を複数の側面から調べてみます。

6.a. GU データを用いて、第 4 節の乗法重力モデル (表 1 の列 (5)) を推定します。ただし、1990-1999 年、2000-2009 年、2010-2023 年の各期間で RTA の効果が異なることを考慮に入れます。(ヒント: 単一の RTA 変数を 3 つの RTA 変数に分割し、各期間ごとに設定する必要があります。) 結果について考察してください。

6.b. 第 4 節の乗法重力モデル (表 1 の列 (5)) を使い、2015 年からのオーストラリア中国自由貿易協定 (ChAFTA) の効果を分離します。そのためには、ダミー変数 ChAFTA を作成する必要があります。この変数は、2014 年以後のオーストラリアと中国の貿易に対して 1 を取ります。次に、この変数を乗法重力モデルに追加します。

6.c. 問 6.b の設定は、RTA 効果からの乖離として ChAFTA の推定値を求めてします。その理由は、RTA 変数に ChAFTA が含まれているためです。ChAFTA それ自体の効果を推定するには、ChAFTA が 1 の場合に RTA 変数を 0 に設定します。その後、問 6.b を再度推定します。2 つの設定から得られた ChAFTA 推定値を比較し、新たに設定した ChAFTA の推定値を解釈してください。

6.d. ChAFTA の効果に非対称性があるかどうかを検証してください。(ヒント: 貿易フローの方向 (オーストラリアから中国へ、中国からオーストラリアへ) に応じて ChAFTA 変数を 2 つの変数に分割します。そして、問 6.c の設定における ChAFTA 変数の代わりに、新たに用意した 2 つの変数を使い、その推定値を比較します。)